地 球 物 理 学 报
CHINESE JOURNAL OF GEOPHYSICS

刘伟军，徐寄遥，袁韡. 2015. 北京地区上空 OH 转动温度的季节性变化. 地球物理学报，58(5)：1467-1474，doi：10.6038/cjg20150501.

Liu W J, Xu J Y, Yuan W. 2015. Seasonal variation of OH rotational temperature measured over Beijing, China. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 58(5): 1467-1474, doi: 10.6038/cjg20150501.

北京地区上空 OH 转动温度的季节性变化

刘伟军[1,2]，徐寄遥[1*]，袁韡[1]

1 中国科学院空间科学与应用研究中心，北京 100190

2 中国科学院大学，北京 100049

摘要 在北京东北方向的兴隆天文台，自主搭建的大气辐射观测仪器对 OH 夜气辉从 2011 年 12 月开始进行观测. 利用高分辨率的 OH(8-3)带的振转光谱计算了转动温度，并与 TIMED/SABER 探测的温度进行了比较. 观测表明，两年(2012—2013)的 OH(8-3)带转动温度平均值为 203.0±11.2 K，有明显的季节变化，冬季高，夏季低，温差可达60 K. 与 SABER 观测温度的季节变化一致. 对日平均的转动温度进行年振荡和半年振荡分量的拟合分析表明，年振荡强度(10.8 K)远大于半年振荡(2.7 K). 研究还发现，不同夜晚转动温度变化形态差别很大，既有很强的潮汐控制的波动，又有相对短周期的波动.

关键词 OH 气辉；转动温度；季节变化；年变化

doi：10.6038/cjg20150501 **中图分类号** P351 **收稿日期** 2014-09-25，2015-01-11 **收修定稿**

Seasonal variation of OH rotational temperature measured over Beijing, China

LIU Wei-Jun[1,2], XU Ji-Yao[1*], YUAN Wei[1]

1 *State Key Laboratory of Space Weather, Center for Space Science and Applied Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100190, *China*

2 *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100049, *China*

Abstract OH airglow emissions are generated in the mesopause and low thermosphere (MLT) region in a layer centered near 87 km. The OH rotational temperature is a good proxy for the kinetic temperature. So the rotational temperatures derived from ground-based observations of OH airglow emissions are used to investigate the temperature structure in the MLT.

The OH airglow emission spectra were observed by the ground-based spectrometer from December 2011 to December 2013. The OH (8-3) band is used to calculate rotational temperature. The temperatures from SABER are weighted vertically by the weighting functions from its OH-A channel volume emission rates. Firstly, the rotational temperature is compared with the SABER. Secondly, the daily mean temperatures are fitted by the harmonic waves, and the temporal variation features during nights are analyzed.

The comparison between OH rotational temperature and SABER shows that the mean rotational temperature of OH(8-3) band is 203.0±11.2 K with 5.5 K warmer than SABER's.

基金项目 国家自然科学基金(41229001, 41331069)，中国科学院重点部署项目(KZZD-EW-01-2)，国家重点基础研究专项经费资助项目(2011CB811405)，空间天气学国家重点实验室专项基金项目资助.

作者简介 刘伟军，男，1985 年生，博士研究生，研究方向为中高层大气. E-mail: wjliu@spaceweather.ac.cn

*通讯作者 徐寄遥，研究员、博士生导师，主要从事大气遥感、中高层大气光化、动力、辐射理论模式和物理机制研究工作. E-mail: xujy@nssc.ac.cn

Both have obviously identical seasonal variations and the temperature variation of winter to summer can reach 60 K. The annual and semiannual components are the two most significant variations, and the annual amplitude of 10.8 K is greater than semiannual amplitude of 2.7 K. Their phases are respectively in December and March. It is shown that there are multiple temporal rotational variations during night, such as oscillations controlled by tides and short-period waves.

The OH rotational temperature is a good proxy for the kinetic temperature in the MLT region. There are significant annual and semiannual variations in this region, and the temperatures during night have various temporal features. It is concluded that the temporal variations of ground-based rotational temperatures from OH(8-3) band are well correlated with the SABER temperatures. They have the same seasonal variations and the annual and semiannual oscillations are the two strongest components. The nocturnal rotational temperatures have multiple temporal features controlled by the various oscillations.

Keywords Hydroxyl airglow; Rotational temperature; Seasonal variation; Annual variation

1 引言

中层顶低热层区域的OH气辉辐射,主要由臭氧和氢的化学反应产生,其位于约87 km高度附近,厚约8 km的薄层.在OH层的高度上,大气密度还是比较的高,有足够的碰撞使相对低转动能级处于局部热力学平衡状态(Sivjee and Hamwey, 1987; Perminov and Semenov, 1992; Pendleton et al., 1993),所以转动温度与周围环境的动力学温度相等.由光谱观测的OH气辉辐射强度和转动温度广泛地应用于高层大气的化学和动力学研究(Fiocco et al., 1970; Abreu and Yee, 1989; Bittner et al., 2000, 2002; Dewan et al., 1992; Dyrland et al., 2010; French et al., 2000; French and Mulligan, 2010; French and Klekociuk, 2011; 高红, 2008).

地基和卫星的遥感是OH气辉辐射最为有效的探测手段.其中,地基的观测可以对某一区域进行长期、高时间分辨率的研究,而卫星则可以给出全球的分布和变化.其中地基观测相对低廉费用,而又能给出比较好的观测结果,因此不同的地基观测技术在全球范围内被广泛采用(Oberheide et al., 2006; López-González et al., 2007; Smith et al., 2010).通过对地基与卫星观测比较,可以对地面观测可靠性进行验证,从而利用地面连续长期的探测研究某一固定区域中高层大气随时间的变化特性.

2011年11月,在北京东北约100 km的国家天文台兴隆台站(40.39°N, 117.58°E)利用光栅光谱仪组建了一套用于大气辐射探测的系统(Zhu et al., 2012).至2014年,已有完整两年的观测.在中国,这是首次利用地面的光谱仪对OH气辉辐射进行长期的观测.与此同时TIMED卫星上搭载的SABER探测器有大气温度和OH气辉发射率的垂直廓线观测.所以本文对这两种观测进行了比较,并且利用计算的OH转动温度研究中层顶区域温度的季节变化,得出了转动温度在夜间的不同变化形态.

2 仪器与数据

我们的大气辐射观测系统——大气辐射光谱仪(Spectrometer of Atmospheric Radiation)主要由科研级的单色仪、CCD,以及光路系统和控制软件构成.单色仪采用Czerny-Turner式结构,焦距550 mm,光栅为1200 gr/mm,闪耀波长500 nm,有很高的光谱分辨率;CCD是1024×256的背照式CCD,单个像元尺寸为26 μm;前置光学系统添加了一个与光谱仪F数相匹配的相机镜头;光线入射狭缝为矩形,高度固定,宽度为0.25 mm,仪器函数的FWHM (Full Width at Half Maximum)约为0.3 nm;仪器的视场角大约是4.5°×0.17°,对应于87 km高度上面积约7 km×0.3 km.观测位置位于国家天文台兴隆台站(40.39°N, 117.58°E),于2011年11月24日投入使用,每天夜晚进行观测,观测谱段包含原子氧的绿线(557.7 nm)和红线(630 nm),原子钠的双线,OH的8-3、4-0、5-1、9-4、6-2、7-3、8-4、7-3以及3-0带,波长范围从530 nm至1000 nm,一个循环周期大约是15 min.同时位于同一台站的全天空照相机,提供了夜间5 min一幅,白天20 min一幅的天

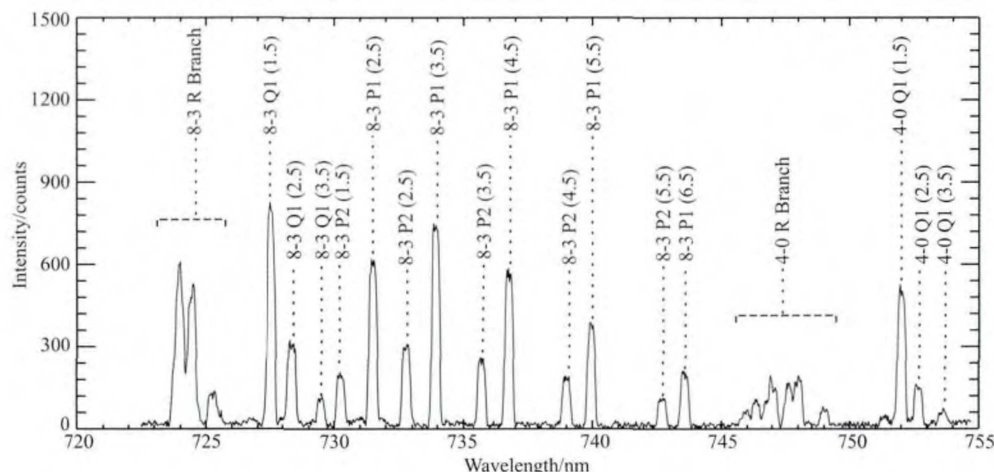


图 1　OH(8-3)带振转光谱(观测于 2011 年 12 月 24 日 18:46)

Fig. 1　Vibration-rotational spectra of OH(8-3) band (observed at 18:46, Dec. 24, 2011)

空云量图片,可以用来对观测天气的筛选.

本文中利用 OH(8-3)带(见图 1)观测计算的转动温度研究中层顶区域的温度的季节性变化. 可用观测光谱的挑选原则:(a)谱线相对孤立不受相邻谱线的污染,以及高能宇宙线的影响;(b)避开大气的吸收线波段,特别是水汽和氧气的吸收线;(c)选择无云晴朗的天气;(d)在暑暮期间,虽然太阳已经落到地平线以下,但太阳光依然能够照射到 OH 层的高度,大气分子就会把太阳光散射到观测视场内,所以要在太阳处于地平线以下 10°;(e)要尽量避免月光的污染,所以要取月亮高度角和月相都很小的情况.

在 OH 层所在高度上,一般认为分子之间的碰撞频率足够使相对低转动能级的 OH 分子处于局部热力学平衡状态(Sivjee and Hamwey,1987),处于某一振动态的 OH(v)分子的转动能级服从 Boltzmann 分布,则谱线的发射强度由以下公式(Mies,1974)给出

$$I = A_{v''j''}^{v'j'} N_{v'} \frac{2(2j'+1)}{Q_{v'}(T_{\rm rot})} \exp\left(-\frac{hc}{kT_{\rm rot}}E(j')\right), \quad (1)$$

其中,I 为谱线强度 photons · $\rm s^{-1}$ · $\rm cm^{-3}$,$N_{v'}$ 为处于振动能级 v' 的分子数密度,$2(2j'+1)$ 为能级简并度,$Q_{v'}(T_{\rm rot})$ 为振动能级 v' 的配分函数,$E(j')$ 为转动能级的能量,$A_{v''j''}^{v'j'}$ 为 Einstein 系数,$T_{\rm rot}$ 为转动温度,h 为 Planck 常数,c 为光速,k 为 Boltzmann 常数. 由于 OH(8-3)带的 P1 分支谱线相对较强且谱线之间可以很好的分开,所以用其来计算转动温度. 如果有同一谱带有两条以上的谱线观测,则利用公式(1)变形后,可得

$$\ln\left(\frac{I}{A \cdot g(j)}\right) = -\frac{hc}{kT_{\rm rot}}E(j) + \ln\left(\frac{N_{v'}}{Q_{v'}}\right), \quad (2)$$

对 $\ln\left(\frac{I}{A \cdot g(j)}\right)$ 和 $E(j)$ 进行直线拟合出斜率 k_0,则

$$T_{\rm rot} = -\frac{hc}{k \cdot k_0}. \quad (3)$$

水汽在 OH(8-3)带 P1(4.5)转动线上有比较强吸收(Espy and Hammond, 1995; Phillips et al., 2004),所以在转动温度计算时需要剔除这一条谱线. 同时考虑上面提到的高转动能级对局部热力学平衡的偏离,因此本文中利用 OH(8-3)带的 P1(2.5)、P1(3.5)和 P1(5.5)三条谱线计算转动温度.

所有的观测研究显示(e. g., Krassovsky et al., 1977; Sivjee and Hamwey, 1987),OH(v)的相对低转动能级基本处于局部热力学平衡状态,所以 OH 转动能级的布居分布由转动温度唯一确定,并且此转动温度等于周围环境温度. 但是,在计算转动温度时采用的 Einstein 系数存在误差,导致计算的转动温度与实际大气温度存在差别. French 等(2000)和 Phillips 等(2004)研究了 OH(6-2)带和 OH(8-3)带的转动温度,结果显示利用 LWR(Langhoff, Werner, and Rosmus)(Langhoff et al., 1986)的 Einstein 系数计算出的转动温度比利用 Mies(Mies,1974)和 TL(Turnbull and Lowe, 1989)的 Einstein 系数计算的转动温度分别低 5 K 和 12 K. 利用 LWR Einstein 系数计算的转动温度与实际温度最为接近,因此本文使用此系数.

TIMED (Thermosphere, Ionosphere, Mesosphere, Energetics, and Dynamics)是 NASA(National Aeronautics and Space Administration,美国国家航空航天局)于 2001 年 12 月发射的一颗中高层大气探测卫星. 我们所需要是其上面搭载的 SABER(Sounding of the Atmosphere by Broadband Emission Radiometry)

(Russell et al., 1999; Remsberg et al., 2008) version 02.0 的 Level 2A 的温度和 OH 发射率的探测数据. SABER 临边探测的温度是利用 CO_2 的红外辐射并考虑非局域热力学平衡条件计算得到,在垂直高度上有很高的分辨率,而水平分辨率相对较低,OH 气辉发射率的探测有 OH-A 和 OH-B 两个通道,波长分别在 2.0 μm 和 1.6 μm,对应的 OH 的谱带分别是 OH(9-7)、OH(8-6)和 OH(5-3)、OH(4-2).

SABER 是采用临边观测的方式得到温度的垂直廓线,而地基的 OH 气辉观测是在垂直高度上的一个积分效应. 不同高度上的气辉强度对于地面观测总强度的贡献正比于 OH(v)的分子的密度,所以某一层高度上 OH 转动温度对地面观测计算得到的转动温度贡献也正比于 OH(v)分子密度. 因此,地面观测到转动温度是 OH 层高度上转动温度以 OH 分子密度分布为权函数的加权等效温度. 而 OH(v)分子密度随高度的分布可用 OH 气辉的发射率来代替. 因此在对以上两种观测进行比较时,需要把 SABER 的温度廓线进行加权平均得到一个等效温度,权函数为 OH(v)的分子密度的垂直分布. 而 SABER 的 OH 发射率观测正好可以用来等效这一权函数. 又考虑到不同振动能级的 OH 分子的垂直分布略有差别,则选择与 OH(8-3)相对应的 SABER OH-A 通道的发射率为权函数,则等效温度为

$$T_{\mathrm{SABER}} = \frac{\sum_{z} T(z) \cdot \mathrm{VER}(z)}{\sum_{z} \mathrm{VER}(z)}, \tag{4}$$

其中 $T(z)$ 为温度垂直廓线, $\mathrm{VER}(z)$ 为 OH-A 通道的 OH 体发射率垂直廓线.

卫星只是在一天中某几个特定时刻才能到达地基观测的上空,同时考虑水平分辨率不高,选择只要卫星观测点在仪器所在地点经纬度±5°的范围,即可用来进行比较. OH 每个谱带循环观测周期约 15 min,所以在 OH 某一谱带观测时间前后 7.5 min 的 SABER 观测即可用来比较.

3 结果与分析

根据上面确定地面与卫星的两种观测时空一致标准挑选数据,2012 年至 2013 年 OH(8-3)带的平均转动温度为 203.0±11.2 K,SABER 观测的平均温度为 197.5±10.5 K. 与 Xiong 等(2012)利用 SATI4 观测的 OH(6-2)带的转动温度在北京天文台(40.30°N,116.19°E)2008 年 7 月至 2009 年 8 月的年平均值 188±13 K 相比,光谱仪观测的 OH(8-3)带的转动温度要高. Cosby 和 Slanger(2007)统计结果显示 OH 转动温度与振动能级有关,不同振动谱带计算出的转动温度不同. 这除了由于不同振动能级 OH(v)分子高度分布存在差别外,计算转动温度时,Einstein 系数选择对温度计算有很大影响(Cosby and Slanger, 2007). Oberheide 等(2006)对 OH(3-1)带转动温度与 SABER 的温度比较显示转动温度要高 7.5 K. López-González 等(2007)对 OH(6-2)带转动温度与 SABER 温度比较时,转动温度也要高 5.7 K. Mulligan 和 Lowe(2008)对 OH(3-1)带转动温度与 ACE-FTS,SABER 温度的比较表明地面的转动温度观测要高 8.6 K. Smith 等(2010)对 OH(6-2)带的转动温度与 SABER 温度比较显示,两者有很好的线性相关性,并且转动温度要比 SABER 温度高 1.7 K. 所有地面观测的 OH 转动温度与卫星观测的温度比较结果都显示,两者存在系统偏差,不过此系统偏差并没有季节性变化. 我们的地基观测与 SABER 观测的比较结果(见图 2)也证实了这一点. 因此可以利用转动温度研究中层顶区域温度的相对变化.

3.1 季节变化

从 2011 年 12 月至 2013 年 12 月总共有效的观测天数为 242 天. 图 3 给出了所有有效的 OH(8-3)带转动温度随时间的变化. 可以看出,转动温度存在非常明显的季节性变化,在夏季 5,6 月份有温度极小值,冬季 11,12 月份有温度极大值,在一个夜晚内,转动温度也存在变化,但相较与季节性的波动还是要小得很多. 在研究转动温度的季节性变化和年变化时,可以对温度进行日平均处理. 由于天气和月光的影响,有时不能整个夜晚都有有效的观测,所以只要这一晚的有效观测数据的累计时间达到4 h,则这一晚即可进行平均来代表这一天的温度.

在中层顶区域的 OH 层,年变化和半年变化是两个最强的波动,所以利用地面观测的日平均的转动温度时间序列对这两种波动进行分析,公式如下(Perminov, 2009):

$$T(t) = T_0 + a_1\cos[(2\pi/365.25)\cdot(t-t_1)] + a_2\cos[(4\pi/365.25)\cdot(t-t_2)], \tag{5}$$

其中 t 为天数, T_0、a_1、a_2 为拟合参数,分别为平均温度、年振荡和半年振荡振幅, t_1 和 t_2 为初始相位. 利用非线性最小二乘拟合出以上参数(见图 4),年变化振幅为 10.8 K,半年变化振幅为 2.7 K. 可以看

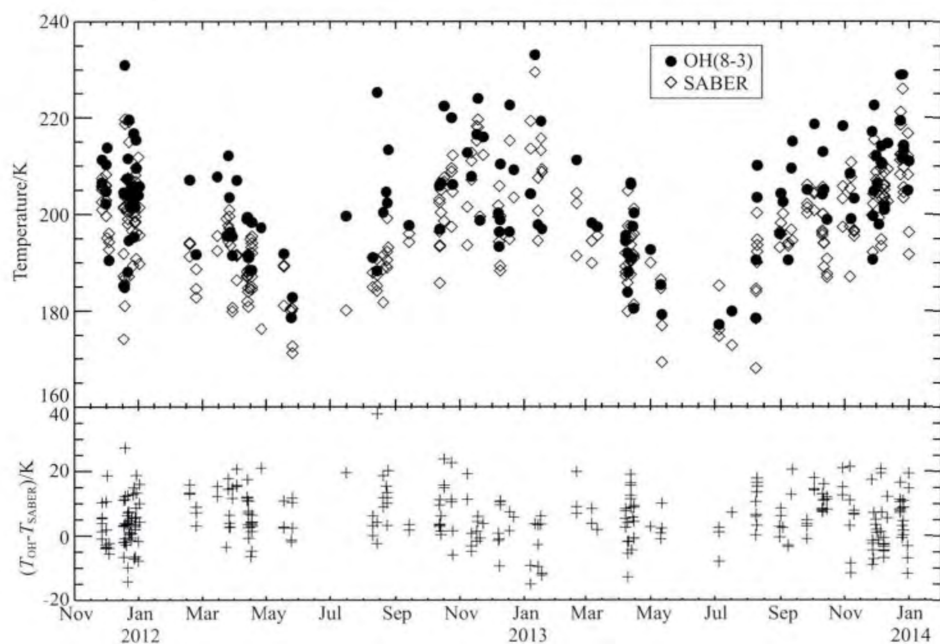


图 2　OH(8-3)带转动温度与 SABER 温度比较

Fig. 2　Comparison of OH(8-3) and SABER temperatures

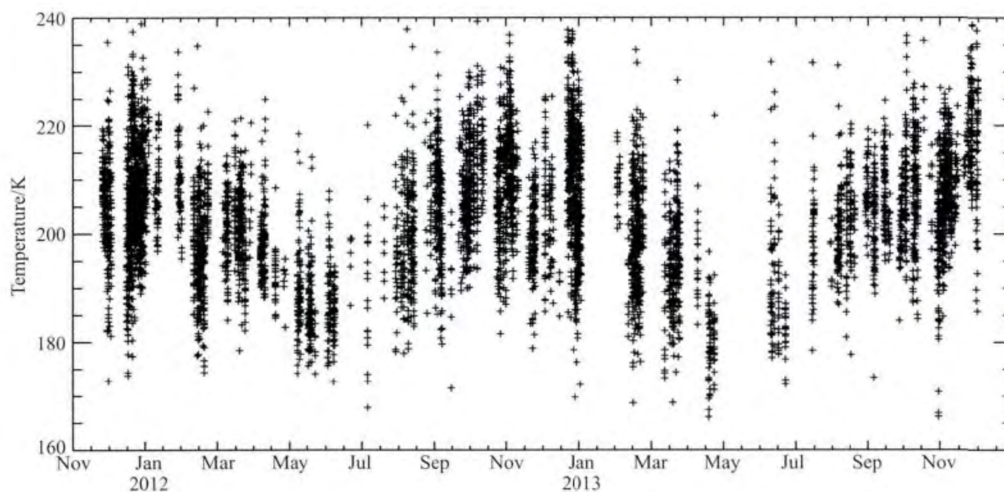


图 3　OH(8-3)带转动温度(2011 年 12 月至 2013 年 12 月)

Fig. 3　The rotational temperature of OH(8-3) (From Dec 2011 to Dec 2013)

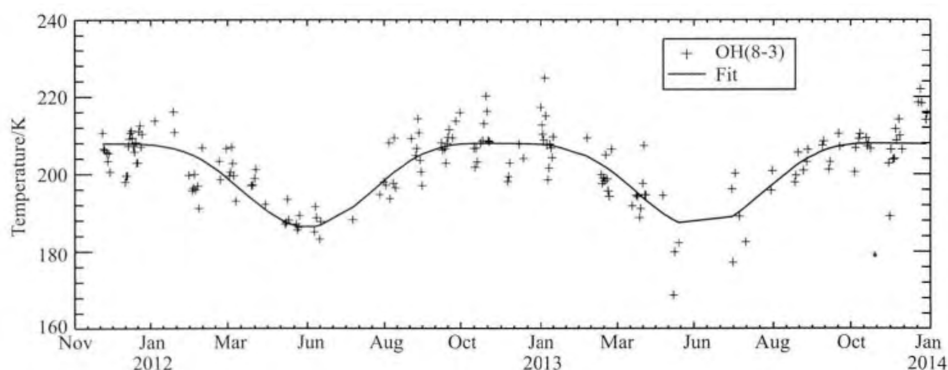


图 4　OH(8-3)带的日平均转动温度季节变化以及由公式(5)拟合曲线

Fig. 4　Daily rotational temperature of OH(8-3) band from Nov 2011 to Dec 2013 and the fitting curve by Eq. (5)

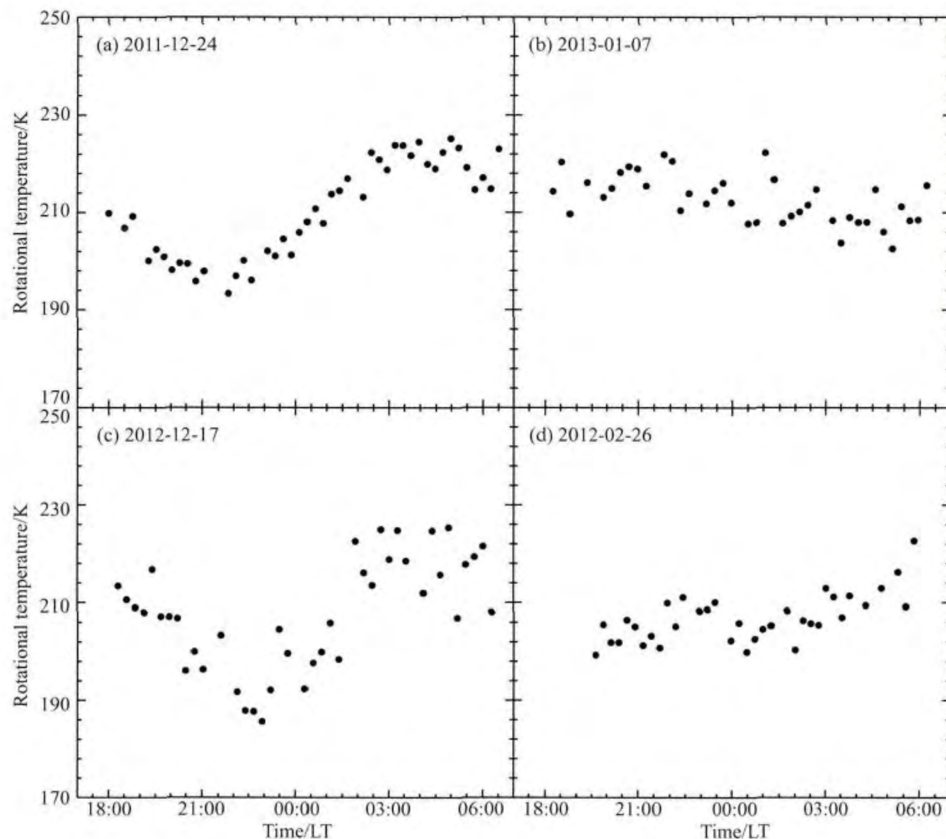


图5 光谱仪观测不同夜晚转动温度随地方时变化

Fig. 5 Rotational temperatures observed by the spectrometer during nights

出年变化的强度远大于半年变化,与 Xiong 等(2012)北京地区 2008 年 7 月至 2009 年 7 月观测相比,我们观测的年变化要小很多,而半年变化则要强一些. Xu 等(2007)利用 2002 年至 2006 年 SABER 的观测计算出 40°N,85 km 高度上的年变化和半年变化分别为 15.8 K 和 2.35 K. López-González 等(2007)在 Sierra Nevada Observatory (37.06°N, 3.38°W)从 1998 年 10 月至 2006 年 7 月观测的 OH (6-2)带的转动温度平均的年振荡振幅为 13 K. 相位计算结果显示年振荡的相位在 12 月初,半年振荡的相位在 3 月底. 而 Xu 等(2007)给出的 40°N 的年振荡和半年振荡的相位分别在冬至和夏至. 与我们观测存在差别原因,Xu 等利用的是 2002—2006 年 SABER 探测温度,并且是 40°N 85 km 高度上的纬向平均.

3.2 日变化

从计算出的转动温度可以看出,不同夜晚的变化形态不同,但基本上还是有占主导作用的波形变化与 Smith 等(2010)的观测类似. 在中纬度地区,潮汐对于中层顶区域的温度有很强的调制作用,并且一些短周期的重力波叠加在相对长周期的潮汐之上,就会呈现出各种的形态变化. 图 5 给出了几种典型的计算的转动温度在夜晚随地方时的变化. 图 5a 显示了 8 h 潮汐占主导地位时,转动温度的夜晚变化形态,并且振幅可达 15 K. 图 5b 则给出了整个夜晚温度基本保持不变,同时叠加小振幅的波动. 图 5c 中可以看出,潮汐特征十分显著,同时又有一些短周期的波动叠加其上. 图 5d 则展示了温度在整个夜晚持续的增加. 以上的转动温度夜晚的多样变化形态,反映了中层顶区域存在丰富的动力学过程.

4 结论

通过安置于中国国家天文台兴隆台站的自主组建的大气辐射观测系统,从 2011 年 12 月开始,对 OH 气辉辐射进行了连续的观测. 利用两年 OH(8-3)带光谱的观测计算转动温度,平均温度为 203.0±11.2 K. 同时 TIMED 卫星上 SABER 探测器有观测点上空的温度剖面观测,其平均温度为 197.5±10.5 K. 通过两种观测结果比较,OH(8-3)带的转动温度要高于 SABER 探测温度,不过两者都存在相同的明显的季节变化,夏季有温度极小值,冬季则有温度极大

值. 通过谐波分析发现，年振荡是最强的波动，振幅达 10.8 K，其次半年振荡，振幅则只有 2.7 K. 年振荡和半年振荡的相位分别在 12 月初和 3 月底.

通过地基观测与卫星观测比较，虽然两者存在系统偏差，但这一偏差没有季节性变化，所以地基观测还是可以用于中层顶区域温度的相对变化的研究. 下一步工作将利用多谱带的 OH 气辉辐射研究不同振动态的 OH(v)分子高度分布的季节变化，以及利用气辉强度或转动温度研究中层顶区域大尺度的波动，如潮汐、行星波等.

致谢　感谢子午工程数据支持. 感谢 TIMED/SABER 团队提供的卫星探测数据.

References

Abreu V J, Yee J H. 1989. Diurnal and seasonal variation of the nighttime OH (8-3) emission at low latitudes. *J. Geophys. Res.*, 94(A9): 11949-11957, doi: 10.1029/JA094iA09p11949.

Bittner M, Offermann D, Graef H H. 2000. Mesopause temperature variability above a midlatitude station in Europe. *J. Geophys. Res.*, 105(D2): 2045-2058, doi: 10.1029/1999jd900307.

Bittner M, Offermann D, Graef H H, et al. 2002. An 18-year time series of OH rotational temperatures and middle atmosphere decadal variations. *J. Atmos. Sol. Terr. Phys.*, 64(8-11): 1147-1166, doi: 10.1016/s1364-6826(02)00065-2.

Cosby P C, Slanger T G. 2007. OH spectroscopy and chemistry investigated with astronomical sky spectra. *Can. J. Phys.*, 85(2): 77-99, doi: 10.1139/p06-088.

Dewan E M, Pendleton W, Grossbard N, et al. 1992. Mesospheric oh airglow temperature fluctuations: A spectral analysis. *Geophys. Res. Lett.*, 19(6): 597-600, doi: 10.1029/92gl00391.

Dyrland M E, Mulligan F J, Hall C M, et al. 2010. Response of OH airglow temperatures to neutral air dynamics at 78°N, 16°E during the anomalous 2003-2004 winter. *J. Geophys. Res.*, 115(D7): D07103, doi: 10.1029/2009jd012726.

Espy P J, Hammond M R. 1995. Atmospheric transmission coefficients for hydroxyl rotational lines used in rotational temperature determinations. *J. Quan. Spectrosc. Radiati. Trans.*, 54(5): 879-889, doi: 10.1016/0022-4073(95)00109-x.

Fiocco G, Visconti G, Congeduti F. 1970. Nocturnal variation of the intensity and rotational temperature of the OH(8,3) band in the airglow. *Nature*, 228(5276): 1079-1080, doi: 1.01038/2281079a0.

French W J R, Mulligan F J. 2010. Stability of temperatures from TIMED/SABER v1.07 (2002—2009) and Aura/MLS v2.2 (2004—2009) compared with OH(6-2) temperatures observed at Davis Station, Antarctica. *Atmos. Chem. Phys.*, 10: 11439-11446, doi: 10.5194/acp-10-11439-2010.

French W J R, Klekociuk A R. 2011. Long-term trends in Antarctic winter hydroxyl temperatures. *J. Geophys. Res.*, 116(D4): D00P09, doi: 10.1029/2011jd015731.

French W J R, Burns G B, Finlayson K, et al. 2000. Hydroxyl (6-2) airglow emission intensity ratios for rotational temperature determination. *Ann. Geophys.*, 18(10): 1293-1303, doi: 10.1007/s00585-000-1293-2.

Gao H. 2008. The study on airglow in middle and upper atmosphere [Ph. D. thesis] (in Chinese). Beijing: Center for Space and Applied Research, Chinese Academy of Sciences.

Krassovsky V I, Potapov B P, Semenov A I, et al. 1977. On the equilibrium nature of the rotational temperature of hydroxyl airglow. *Planet. Space Sci.*, 25(6): 596-597, doi:10.1016/0032-0633(77)90067-8.

Langhoff S R, Werner H J, Rosmus P. 1986. Theoretical transition-probabilities for the OH Meinel system. *J. Mol. Spectrosc.*, 118(2): 507-529, doi:10.1016/0022-2852(86)90186-4.

López-González M J, García-Comas M, Rodríguez E, et al. 2007. Ground-based mesospheric temperatures at mid-latitude derived from O_2 and OH airglow SATI data: Comparison with SABER measurements. *J. Atmos. Sol. Terr. Phys.*, 69(17-18): 2379-2390, doi: 10.1016/j.jastp.2007.07.004.

Mies F H. 1974. Calculated vibrational transition probabilities of OH(X2Π). *J. Mol. Spectrosc.*, 53(2): 150-188, doi: 10.1016/0022-2852(74)90125-8.

Mulligan F, Lowe R. 2008. OH-equivalent temperatures derived from ACE-FTS and SABER temperature profiles—a comparison with OH*(3-1) temperatures from Maynooth (53.2°N, 6.4°W). *Ann. Geophys.*, 26(4): 795-811, doi:10.5194/angeo-26-795-2008.

Oberheide J, Offermann D, Russell J M, et al. 2006. Intercomparison of kinetic temperature from 15 μm CO_2 limb emissions and OH* (3,1) rotational temperature in nearly coincident air masses: SABER, GRIPS. *Geophys. Res. Lett.*, 33(14): L14811, doi: 10.1029/2006gl026439.

Pendleton W R Jr, Espy P J, Hammond M R. 1993. Evidence for non-local-thermodynamic-equilibrium rotation in the OH nightglow. *J. Geophys. Res.*, 98(A7): 11567-11579, doi: 10.1029/93ja00740.

Perminov V I. 2009. Seasonal temperature variations near the mesopause according to the hydroxyl emission measurements in Zvenigorod. *Geomagn. Aeron.*, 49(6): 797-804, doi: 10.1134/S0016793207060084.

Perminov V I, Semenov A I. 1992. Nonequilibrium of the rotational temperature of OH bands with high vibrational excitation. *Geomagn. Aeron.*, 32(2): 175-178.

Phillips F, Burns G B, French W J R, et al. 2004. Determining rotational temperatures from the OH (8-3) band, and a comparison with OH(6-2) rotational temperatures at Davis, Antarctica. *Ann. Geophys.*, 22(5): 1549-1561, doi: 10.5194/angeo-22-1549-2004.

Remsberg E E, Marshall B T, Garcia-Comas M, et al. 2008.

Assessment of the quality of the Version 1.07 temperature-versus-pressure profiles of the middle atmosphere from TIMED/SABER. *J. Geophys. Res.*, 113(D17): D17101, doi: 10.1029/2008jd010013.

Russell J M, Mlynczak M G, Gordley L L. 1999. Overview of the SABER experiment and preliminary calibration results. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, 3756: 277-288, doi:10.1117/12.366382.

Sivjee G G, Hamwey R M. 1987. Temperature and chemistry of the polar mesopause OH. *J. Geophys. Res.*, 92(A5): 4663-4672, doi: 10.1029/JA092iA05p04663.

Smith S M, Baumgardner J, Mertens C J, et al. 2010. Mesospheric OH temperatures: Simultaneous ground-based and SABER OH measurements over Millstone Hill. *Adv. Space Res.*, 45(2): 239-246, doi: 10.1016/j.asr.2009.09.022.

Tubull D N, Lowe R P. 1989. New hydroxyl transition-probabilities and their importance in airglow studies. *Planet. Space Sci.*, 37(6):723-738, doi:10.1016/0032-0633(89)90042-1.

Xiong J G, Wan W X, Ning B Q, et al. 2012. Seasonal variations of night mesopause temperature in Beijing observed by SATI4. *Science China Technological Sciences*, 55(5): 1295-1301, doi: 10.1007/s11431-012-4779-8.

Xu J Y, Smith A K, Yuan W, et al. 2007. Global structure and long-term variations of zonal mean temperature observed by TIMED/SABER. *J. Geophys. Res.*, 112(D24): D24106, doi: 10.1029/2007JD008546.

Zhu Y J, Xu J Y, Yuan W, et al. 2012. First experiment of spectrometric observation of hydroxyl emission and rotational temperature in the mesopause in China. *Sci. China Technol. Sci.*, 55(5): 1312-1318, doi: 10.1007/s11431-012-4824-7.

附中文参考文献

高红. 2008. 中高层大气气辉辐射研究[博士论文]. 北京:中国科学院研究生院(空间科学与应用研究中心).

(本文编辑 何燕)